



Centro Universitário de Brasília - UNICEUB  
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS  
Curso de Engenharia Civil

BRUNA LUISA AMARAL

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA EM ÁREAS SUSCETÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS PRESENTES NO CONDOMÍNIO SOL  
NASCENTE, DISTRITO FEDERAL, BRASIL**

Brasília-DF

2018

BRUNA LUISA AMARAL

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA EM ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS PRESENTES NO CONDOMÍNIO SOL  
NASCENTE, DISTRITO FEDERAL, BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário de  
Brasília (UniCEUB), como requisito para  
obtenção do título de graduação em  
Engenharia Civil

Orientadora: Prof. (a) M. Sc. Gabriela de  
Athayde Duboc Bahia

Brasília

2018

BRUNA LUISA AMARAL

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA EM ÁREAS SUSCETÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS PRESENTES NO CONDOMÍNIO SOL  
NASCENTE, DISTRITO FEDERAL, BRASIL**

Monografia apresentada ao Centro  
Universitário de Brasília (UniCEUB), como  
requisito para obtenção do título de  
graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. (a) Msc. Gabriela de  
Athayde Duboc Bahia

Brasília, 04 de dezembro de 2018.

**Banca Examinadora**

---

Prof. (a) M.Sc. Gabriela de Athayde Duboc Bahia  
Orientadora

---

Prof. D.Sc. Rideci de Jesus da Costa Farias  
Examinador interno

---

Prof. D.Sc. Jairo Furtado Nogueira  
Examinador interno

Dedico a minha família, que tornaram mais um sonho possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por estar todos os dias ao meu lado, levantando-me nos dias de fraqueza e me dando forças para prosseguir.

Agradeço à minha orientadora, professora Gabriela de Athayde Duboc Bahia, por acreditar no meu trabalho e na minha capacidade, ajudando-me na busca de novos conhecimentos, incentivando-me a encontrar o melhor caminho para fazer a diferença e por ter se dedicado a esse tempo de pesquisa ao meu lado.

A todos os meus professores do UniCEUB, que me passaram o conhecimento necessário para chegar até aqui e a todos os amigos e colegas que me auxiliaram e estiveram comigo durante a graduação.

À minha mãe Francisca Eugênia Oliveira Amaral, ao meu pai Dinamar Amaral e aos meus irmãos por me incentivar e me dar forças para chegar ao fim de mais uma etapa da minha vida, estando presente e me dando todo o apoio necessário.

E a José Fuscaldi Cesilio Neto que me encorajou a seguir o meu sonho de fazer engenharia civil, sempre me auxiliando com todo amor e carinho.

Agradeço a todos.

Ninguém é tão grande que não possa aprender,  
nem tão pequeno que não possa ensinar.

*(Esopo)*

## RESUMO

Movimentos de massa constituem eventos desastrosos, especialmente em áreas tropicais e montanhosas, onde estes processos são intensificados pelas atividades antrópicas. A ocupação urbana crescente e indiscriminada em áreas desfavoráveis, sem o planejamento adequado do uso do solo e incorporação apropriada de técnicas de estabilização, tem resultado em acidentes relacionados a processos dessa natureza que, muitas vezes, levam proporções de desastres. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a rápida expansão urbana que ocorreu nos últimos anos no condomínio Sol Nascente, localizado na cidade satélite de Ceilândia, Distrito Federal, situando este crescimento em relação às áreas com tendência a desenvolvimento de eventos de movimentos de massa. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite da série *Landsat* para os anos de 2011 e 2017, as quais foram classificadas quanto ao uso e ocupação do solo a partir da avaliação do seu comportamento espectral. De forma paralela, um mapa de ameaça a ocorrência de deslizamentos rasos dado em termos probabilísticos é utilizado e confrontado com a malha urbana estabelecida. O resultado da pesquisa permitiu verificar a tendência de ampliação da malha urbana e observar se o adensamento se direciona no sentido de áreas que apresentam susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa. Como conclusão, pode-se afirmar que a abordagem metodológica baseada em uma ferramenta de detecção remota, combinada com modelos de estabilidade de encostas, estabelecida em sistemas de informação geográfica, se mostra eficiente para estudos de uso e ocupação do solo, assim como para fins de planejamento urbano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Movimentos de massa, expansão urbana, Sol Nascente e *Landsat*.

## **ABSTRACT**

Landslides are disastrous events, especially in tropical and mountainous areas, where these processes are intensified by anthropic activities. Increasing and indiscriminate urban occupation in unfavorable areas, without adequate land use planning and adequate incorporation of stabilization techniques, have resulted in accidents related to processes of this nature that often lead to disaster proportions. The present work aims to evaluate the rapid urban expansion that occurs in recent years in the Sol Nascente condominium, located in the satellite city of Ceilândia, Federal District, Brazil, where this growth is located in areas with a tendency to develop landslides events. For this purpose, satellite images of the Landsat series were used for the years 2011 and 2017, which were classified as to the land use based on the evaluation of its spectral behavior. In parallel, a probability map of susceptibility to the occurrence of landslides is constructed and confronted with the established urban network. The result of the research allowed to verify the tendency of urban mesh expansion and to observe if the density is directed towards areas that are susceptible to the occurrence of landslides. As a conclusion, it is stated that the methodological approach based on a remote sensing tool, combined with slope stability models, established in geographic information systems, is efficient for studies of land use, as well as for urban planning.

**KEYWORDS:** Landslides, urban expansion, Sol Nascente and Landsat.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organização de um SIG.....	25
Figura 2: Geóide.....	27
Figura 3: Ponto de interseção entre geoide e elipsoide (Datum).....	27
Figura 4: Resolução Espacial.....	28
Figura 5: Mapa do Setor Sol Nascente dividido em três trechos .....	37
Figura 6: Landsat 8 - (a) Banda 8 sem realce.....	39
Figura 7: Landsat 8 - (a) Composição colorida RGB .....	40
Figura 8: (a) NDVI .....	41
Figura 9: Landsat 8 - (a) PC1 (Banda de 30 metros).....	42
Figura 10: Segmentação utilizada no projeto.....	43
Figura 11: Cartas de probabilidade de ruptura para a área analisada (Azevedo et al., 2013) .....	45
Figura 12: Classificação com base na imagem de 2011 .....	46
Figura 13: Classificação com base na imagem de 2017 .....	46
Figura 14: Configuração da probabilidade de ruptura frente a ocupação urbana em 2011. ....	48
Figura 15: Configuração da probabilidade de ruptura frente a ocupação urbana em 2017. ....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tipo de material que compõe o solo em função da sucção matricial .....	21
Gráfico 2: Sucção Matricial (KPa) .....	22

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Descrição dos tipos de movimentos de massa.....	19
Quadro 2: Características dos satélites Landsat-5 e Landsat-8.....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de solos associados aos valores dos respectivos parâmetros característicos .....	36
Tabela 2: Classificação da área de estudo nas datas analisadas. ....	47
Tabela 3: Áreas urbanas e não urbanas para 2011 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura .....	47
Tabela 4: Áreas urbanas e não urbanas para 2017 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura .....	47

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AGEFIS - Agência de Fiscalização do Distrito Federal

ANA - Agência Nacional de Águas

DPI - Divisão de Processamento de Imagens

ETM - Enhanced Thematic Mapper

FOSM - First Order Second Moment

HPGL - High Performance Geostatistics Library

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IHS - Intensidade, Cor ou Matriz e Saturação

INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

NDVI - Vegetação por Diferença Normalizada

NDWI - Índice de Diferença Normalizada da Água

OLI - Operacional Terra Imager

PC - Componentes Principais

PDI - Processamento Digital de Imagens

RGB – Vermelho, Verde e Azul

RISKLAB - Risk-Landslide-Laboratory

SGBD - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

TIRS - Thermal Infrared Sensor

TM - Thematic Mapper

USGS - United States Geological Survey

UTM - Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	OBJETIVO .....	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Características gerais dos movimentos de massa.....	18
2.2	Mecanismo que influencia na ruptura de taludes.....	22
2.3	Sistemas de informação geográfica como ferramenta para a análise de deslizamentos rasos .....	23
2.4	Sistema de Informação Geográfica (SIG) .....	24
2.5	Datum .....	26
2.6	Imagens de Satélite .....	27
2.7	Características das Imagens .....	28
2.8	Processamento Digital de Imagens .....	32
2.9	Spring .....	32
2.10	Mapa de Ameaça gerado por George Azevedo no RiskLab .....	33
3	Caracterização da Área de Estudo .....	37
4	METODOLOGIA .....	38
4.1	Processamento Digital de Imagens .....	38
4.2	Avaliação de ameaça em termos de probabilidade de ruptura .....	44
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS .....	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
7	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .....	51
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

## **1 INTRODUÇÃO**

A ocupação urbana de forma irregular é geradora dos principais transtornos enfrentados nas cidades. Dentre os problemas provocados por essa situação encontram-se os deslizamentos rasos que ocorrem em áreas de risco geotécnico. Estes apresentam-se como obstáculos para as atividades humanas, causando perdas econômicas, altos custos de manutenção, lesões ou mortes (Das, 2010).

A urbanização crescente e indiscriminada em áreas desfavoráveis, sem planejamento adequado do uso do solo e incorporação adequada de técnicas de estabilização, tem resultado em acidentes relacionados a processos dessa natureza que, muitas vezes, levam proporções desastrosas (Tominaga, 2007). Isso justifica a necessidade em criar metodologias novas e mais eficientes para melhorar a compreensão do risco de deslizamentos de terras, visando um melhor processo de decisão em relação à alocação de recursos para gerenciamento de risco (Guzzetti, 2000).

O principal objetivo do trabalho consistiu na aplicação de uma metodologia capaz de averiguar o rápido crescimento na área do condomínio Sol Nascente, situado na cidade satélite de Ceilândia, visando uma melhor compreensão do fenômeno da expansão urbana na região. De forma adicional, na tentativa de fornecer uma abordagem focada em intervenções voltadas para o planejamento urbano, este trabalho também procura realizar uma comparação entre a área urbana do condomínio em dois momentos distintos e uma carta de ameaça a eventos de movimento de massa, observando se há uma tendência de direcionamento da ocupação para pontos considerados críticos em termos de estabilidade.

### **1.1 OBJETIVO**

#### **1.1.1 Geral**

- O presente trabalho tem como objetivo avaliar a rápida expansão urbana que ocorreu nos últimos anos no condomínio Sol Nascente, localizado na cidade

satélite de Ceilândia, Distrito Federal, situando este crescimento em relação às áreas com tendência a desenvolvimento de eventos de movimentos de massa.

### 1.1.2 Específicos

- Classificação das imagens de satélite da série *Landsat* para os anos de 2011 e 2017, quanto ao uso e ocupação do solo a partir da avaliação espectral.
- Elaboração de um mapa de ameaça através do *software RiskLab* desenvolvido por George Azevedo.
- Confronto entre o mapa de ameaça e a classificação de cada imagem respectivamente, para se verificar a tendência de ampliação da malha urbana e observar se o adensamento se direciona no sentido de áreas que apresentam suscetibilidade a ocorrência de movimentos de massa.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Além da Rocinha e de outras grandes comunidades carentes de Buenos Aires (Argentina) e La Paz (Bolívia); o Sol Nascente, na Ceilândia, cidade satélite de Brasília, é considerada a maior favela da América Latina. Em épocas de chuva, alguns pontos dessa cidade podem trazer riscos aos moradores, aumentando as chances de acidentes e alagamentos.

O Condomínio Sol Nascente é uma das regiões com maiores índices de áreas de risco, devido à existência de ocupações irregulares e desordenadas. Dados da Secretaria de Defesa Civil revelam que o local possui aspectos biológicos, geológicos e geotécnicos que predispõem alta potencialidade para o desenvolvimento de áreas consideradas de risco.

Alguns pontos que ameaçam a construção civil estão listados abaixo:

- Ocupação irregular do solo;
- Falta de sistema de drenagem de águas pluviais;
- Falta de saneamento básico;



- Lixo e entulho;
- Esgoto a céu aberto;
- Estrutura precária das casas;
- Fixação dos telhados das casas inadequada;
- Águas servidas jogadas nas encostas;
- Casas próximas à erosão;
- Lixos e esgoto jogados em córregos.

No Brasil, a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e proíbe que áreas de risco sejam loteadas para fins urbanos. Apesar disso, muitas vezes o próprio poder público tem levado infraestrutura a essas áreas, contribuindo, assim, para o adensamento da ocupação.

As residências, normalmente construídas em condições impróprias e em terrenos irregulares, constituem uma ameaça às famílias próximas e à comunidade local. Na prevenção aos desastres naturais, inúmeras medidas podem ser adotadas, de natureza estrutural ou não estrutural.

As estruturais podem ser mais eficientes, mas muitas vezes são inviabilizadas pelo seu alto custo, já que se traduzem na execução de obras muitas complexas e de grande porte. Já as medidas não estruturais se referem basicamente ao planejamento e controle do uso do solo, de modo que sejam atribuídos, a cada área, usos compatíveis com suas características físicas (declividade, tipo de solo, configuração da rede hídrica, etc) e às restrições à ocupação.

Dessa forma, torna-se necessário tomar medidas mitigadoras a fim de controlar essa urbanização e avaliar o risco da região em questão. O presente trabalho vem como uma medida não estrutural, pois tem como objetivo fazer uma análise do uso e ocupação do solo mostrando o risco associado ao Condomínio Sol Nascente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características gerais dos movimentos de massa

Os movimentos de massa têm sua origem relacionada a uma variedade extensa de atividades geológicas, hidrometeorológicas, químicas e mecânicas que têm lugar na crosta terrestre (Entralgo, 2013). As encostas, visando a um estado central compatível com o equilíbrio em relação aos processos nelas atuantes, no sentido de obter um arranjo mais eficiente possível, apresentam uma tendência frequente a mudanças (Bloom, 1988). Neste sentido, segundo Azevedo (2015), existem dois tipos de movimentos, aqueles de natureza tectônica que tendem a originar montanhas e em contrapartida outros que proporcionam uma desestabilização e consequente alteração do relevo, na tentativa de impor uma condição mais plana, como as ações do intemperismo, os sismos, as chuvas e demais eventos (como a própria ação antrópica).

Tendo isso em mente, García (2004) destaca que uma diretriz básica na realização de uma análise que envolva o risco e as consequências do deslizamento está vinculada à identificação dos tipos de movimentos de massa, uma vez que estes episódios podem diferir em termos de forma, dimensão, velocidade, materiais envolvidos, estado de atividade, entre outras características, atentando, ainda, que este reconhecimento pode ser realizado por intermédio de técnicas de sensoriamento remoto ou estudos de campo.

Atualmente, as classificações dos movimentos de massa propostas por Varnes (1958, 1978) e Hutchinson (1968, 1988) são sistemas amplamente aceitos na comunidade científica. De acordo com as prerrogativas expostas por esses autores, o critério principal na sua classificação é o tipo de movimento e a natureza do material, podendo ser dividido em cinco categorias distintas: quedas (*falls*), tombamentos (*topless*), deslizamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*), corridas, escoamentos ou fluxos (*flows*); e duas classes de material: rocha e solo, este último subdividido em detritos e terra. Porém, os movimentos de massa podem formar uma falha complexa envolvendo mais do que um tipo de movimento e material ao mesmo tempo ou durante a vida do movimento, formando subcategorias menos comuns (Highland & Bobrowsky, 2008, Guzzetti, 2012).

Posteriormente, Cruden & Varnes (1996) propuseram modificações para a classificação de Varnes (1978). Apesar de ela continuar com os mesmos cinco tipos de movimentos e os dois tipos de materiais, passaram a levar em consideração dois aspectos mensuráveis, que são o conteúdo de água e a velocidade, o que acaba por configurar uma grande quantidade de movimentos distintos que podem surgir pela combinação desses critérios. Os diferentes critérios de classificação dos movimentos de massa segundo a classificação de Cruden & Varnes (1996) encontram-se resumidos na Quadro 1.

Quadro 1: Descrição dos tipos de movimentos de massa

DESCRIÇÃO DO PRIMEIRO MOVIMENTO			
TIPO	MATERIAL	CONTEÚDO DE ÁGUA (COMPORTAMENTO)	VELOCIDADE
Quedas	Rocha	Seco (sólido)	Extremamente rápido (> 3m/s)
Tombamentos		Úmido (plástico)	Muito rápido (3m/s - 0.3m/min)
Deslizamentos ou Escorregamentos	Solos (Terra ou Detritos)	Úmido (plástico)	Rápido (0.3m/min - 1.5m/dia)
Espalhamentos		Molhado (líquido)	Moderado (1.5m/dia - 1.5m/mês)
Fluxos, Corridas ou Escoamentos		Muito molhado (líquido)	Lenta (1.5m/mês - 1.5m/ano)
			Muito lenta (1.5m/ano - 60mm/ano)
			Extremamente lenta (< 60mm/ano)

Fonte: Cruden & Varnes (1996)

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), quedas são desprendimentos de rocha ou terra, ou ambos, de penhascos ou taludes com atividade elevada. A matéria descendente geralmente bate nas paredes inferiores do talude num ângulo menor que o ângulo da queda, causando saltos. A massa em queda pode quebrar no impacto, pode iniciar um rolamento em taludes mais íngremes e pode continuar até a cota mais baixa do terreno.

O tombamento é um tipo de movimento de massa no qual tem lugar uma rotação, geralmente em sentido perpendicular a um plano de ruptura e em torno de um eixo ou ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. Ocorre pela ação da gravidade e esforços de empuxo de unidades adjacentes ou fluidos dentro de fraturas (Varnes, 1978).

Deslizamento ou escorregamento é um movimento descendente de uma massa de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de uma superfície de falha ou de uma delgada zona de deformação e de cisalhamento intenso (Highland & Bobrowsky, 2008).

Os espalhamentos são um tipo de movimento de massa no qual o deslocamento ocorre predominantemente por deformação interna do material (PMA:GCA, 2007). O referido movimento se dá em solos coesivos ou maciços rochosos e com subsidência de um material mole subjacente.

A última forma de movimentação de massa apresentada por Cruden & Varnes (1996) são as corridas de massa, que, de acordo com os autores, acontecem com o escoamento rápido do solo, de natureza hidrodinâmica. Nesses casos, o excesso de água é responsável pela diminuição da resistência do substrato. Dessa forma, a massa se movimenta como se fosse um líquido viscoso.

Dessa forma, vale ressaltar que os movimentos de massa resultam de uma paulatina mudança imposta por processos naturais, como chuva intensa, eventos sísmicos ou até mesmo marés atmosféricas que ocasionam uma redução da resistência ao cisalhamento ou um aumento dos esforços atuantes. Destaca-se que a precipitação se apresenta como a principal responsável pela determinação de episódios de movimentos de massa denominado como escorregamentos rasos, os quais apresentam uma superfície de deslizamento planar. Este trabalho foca-se exatamente no estudo destes escorregamentos rasos deflagrados por chuvas.

As chuvas são, geralmente, causa preponderante na ocorrência de deslizamentos. O efeito grandeza desta influência depende, dentre outros fatores, das condições climáticas, da topografia local, da estrutura geológica das encostas e da permeabilidade do solo.

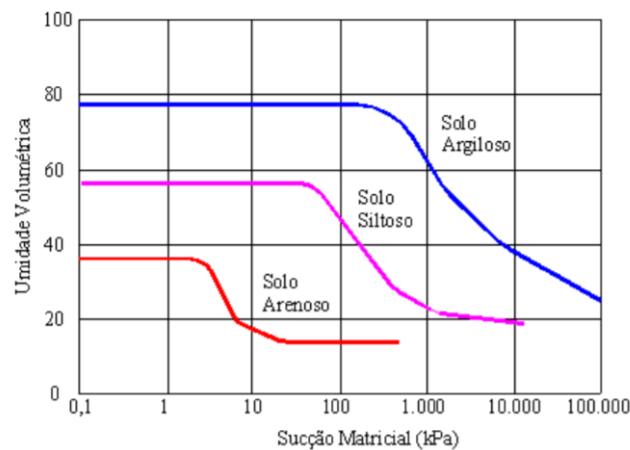
Em geral a resistência ao cisalhamento dos solos governa a instabilidade de taludes. Essa resistência é devido a dois fatores inerentes aos solos: fricção e coesão. A parcela friccional se deve ao atrito entre os grãos, que pode aumentar de acordo com o grau de entrosamento desses e o nível de tensão ao qual eles estão submetidos. Já a parcela coesiva pode se dar pela cimentação ou por forças físico-químicas. A cimentação trata-se de elementos que se comportam como uma “cola” entre os grãos, dando a eles um alto grau de entrosamento. Já as forças físico-químicas podem ser representadas tanto como a atração química entre a superfície dos grãos como a atração física devido a parcelas carregadas eletricamente.

No caso de solos não saturados existe uma terceira parcela devido a forças capilares e de adsorção. Essas forças são denominadas de sucção mátrica, ou seja,

é uma força de atração entre os grãos devido ao menisco de água que tem determinada resistência a tração. Como a sucção é relacionada as forças capilares e de adsorção, ela é função do tipo de partícula e do arranjo estrutural dessas partículas.

A medida que diminui o tamanho da partícula, a sucção vai aumentando, ou seja, mais áreas de contato com o menisco atraem essas partículas. Sabe-se que o solo arenoso tem uma sucção da ordem de 100 KPa, o solo siltooso pode chegar a 10 mil KPa e o solo argiloso a mais de 100 mil KPa. Logo o tipo de material que compõe o talude tem uma grande influência na instabilidade do talude, como observado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Tipo de material que compõe o solo em função da sucção matricial



Fonte: Silva (2005)

No caso de solos não saturados a equação que rege a resistência ao cisalhamento está explícita na Equação 1.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma - U_a)t_g\phi' + (U_a - U_w)t_g\phi^b$$

[1]

Onde:

$c'$ : coesão do solo no caso de não haver sucção

$(\sigma - U_a)$ : tensão total - pressão atm; isso significa tensão normal efetiva

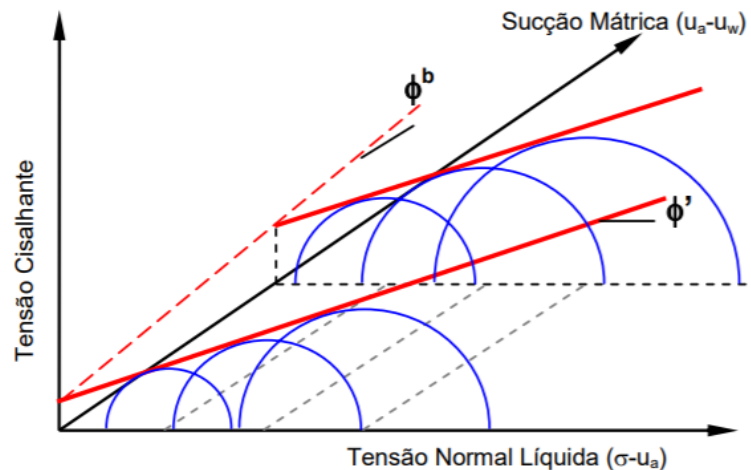
$\phi'$ : ângulo de atrito associado somente a parcela de tensão que despreza a sucção

$(U_a - U_w)$ : pressão atm - pressão de vapor da água; sucção mátrica

$\phi^b$ : ângulo de atrito que tem relação com o aumento da resistência em função da sucção mátrica

Essa equação acaba por gerar a seguinte envoltória de ruptura no caso de solos não saturados (Gráfico 2):

Gráfico 2: Sucção Matricial (KPa)



Silva (2005)

Observa-se acima a possibilidade de ocorrência de rupturas de taludes em decorrência da redução da sucção, que pode ser associada à variação do grau de saturação do solo do talude. Assim, o fluxo de água decorrente da infiltração deve ser levado em consideração, admitindo-se que a ruptura ocorre na região já saturada pela frente de saturação, ou próximo a esta. Durante os períodos de ocorrência de chuvas frequentes, há um aumento contínuo e gradual do grau de saturação, logo uma diminuição da sucção e, conseqüentemente, das tensões efetivas, acarretando numa redução da resistência ao cisalhamento do solo, o que, eventualmente, pode levar o talude à ruptura. O provável mecanismo pode ser descrito da seguinte forma.

## 2.2 Mecanismo que influencia na ruptura de taludes

Antes do período de chuvas, o solo se encontra não-saturado (grau de saturação da ordem de oitenta por cento, ou menos), apresentando poro-pressões negativas, que originam, na sua envoltória de resistência, uma coesão aparente que é, em muitos casos, o fator preponderante na estabilidade do talude ou da encosta.

Quando ocorrem as primeiras chuvas, as camadas superficiais do talude absorvem água, com isso aumentam seu grau de saturação e, em consequência, sua condutividade hidráulica.

Forma-se, então, a dita frente de saturação, que avança até alguns decímetros ou metros de profundidade, à medida que as chuvas persistem. O grau de saturação inicial, o índice de vazios do solo, sua textura e plasticidade, os dados das precipitações pluviométricas, o tipo e a densidade de cobertura vegetal e, também a inclinação do talude ou encosta influem na profundidade e na velocidade de avanço da frente de saturação.

Quando o grau de saturação atinge valores próximos de 100% e a frente de saturação ultrapassa profundidades da ordem de alguns metros, apesar de se estabelecer algum fluxo na direção paralela à face do talude, a direção predominante de fluxo é vertical, em decorrência das forças gravitacionais e capilares.

Cessadas as precipitações, ocorre uma redistribuição da água que infiltrou, com o consequente aumento do teor de umidade médio, na região acima da frente de saturação.

Na ocorrência de uma nova precipitação, o avanço da frente de saturação será mais rápido, continuando o processo de saturação do talude, a consequente redução da sucção e da resistência ao cisalhamento do solo e o aumento do seu peso próprio. Esta conjugação de efeitos pode levar à ruptura da encosta ou do talude.

### **2.3 Sistemas de informação geográfica como ferramenta para a análise de deslizamentos rasos**

Os movimentos de massa são fenômenos que ocorrem de formas diversas; rápidos ou lentos, originados na natureza ou provocados pelo ser humano. São influenciados por diversos agentes e têm causas diversas. Sua ocorrência pode ser localizada ou generalizada. Podem trazer consequências econômicas, sociais, naturais e principalmente ameaçar a vida de milhares de pessoas. Uma das formas para reduzir o impacto desses fenômenos na sociedade é a realização de gestão do risco, que tem como passo inicial a avaliação do risco.

Tendo em vista esse cenário, o geoprocessamento e suas tecnologias têm contribuído para a tomada de decisão na gestão e planejamento ambiental a nível federal, estadual e municipal perante os órgãos e mais variadas instituições, na resolução de problemas ambientais, e na estratégia de previsão de riscos e melhoria de qualidade ambiental. Estes instrumentos proporcionam respostas aos

questionamentos impostos em um tempo menor do que aquele requerido antes do seu surgimento.

Silveira & Ramos (2007) destacam que os sistemas de informação geográfica (SIG) se sobressaem no conjunto destas geotecnologias pelo fato de possibilitar a integração de um volume substancial de informações geográficas e alfanuméricas correlacionadas. Dessa forma, as possibilidades de análise são ampliadas, juntamente com a otimização do tempo de recuperação e tratamento dos dados inter-relacionados. Avanços alcançados na tecnologia dos sistemas de informação geográfica e em ferramentas matemáticas e estatísticas voltadas para a modelagem e simulação têm permitido a crescente aplicação de técnicas de caráter quantitativo em vários campos das ciências da Terra (Carrara & Pike, 2008).

Conforme Reis et al. (2003), a elaboração de modelos de avaliação de suscetibilidade cada vez mais complexos fundamentados em métodos quantitativos foi permitida pelo uso de sistemas de informação geográfica, uma vez que propicia o cruzamento de um grande número de temas cartográficos e a análise estatística da relação entre os deslizamentos identificados e as variáveis independentes espacializadas.

Desta forma, a fusão entre um bom modelo de avaliação de suscetibilidade aos movimentos de massa e os sistemas de informação geográfica geram um instrumento poderoso para os profissionais das áreas envolvidas na mitigação dos riscos e no controle do crescimento das cidades (García, 2004).

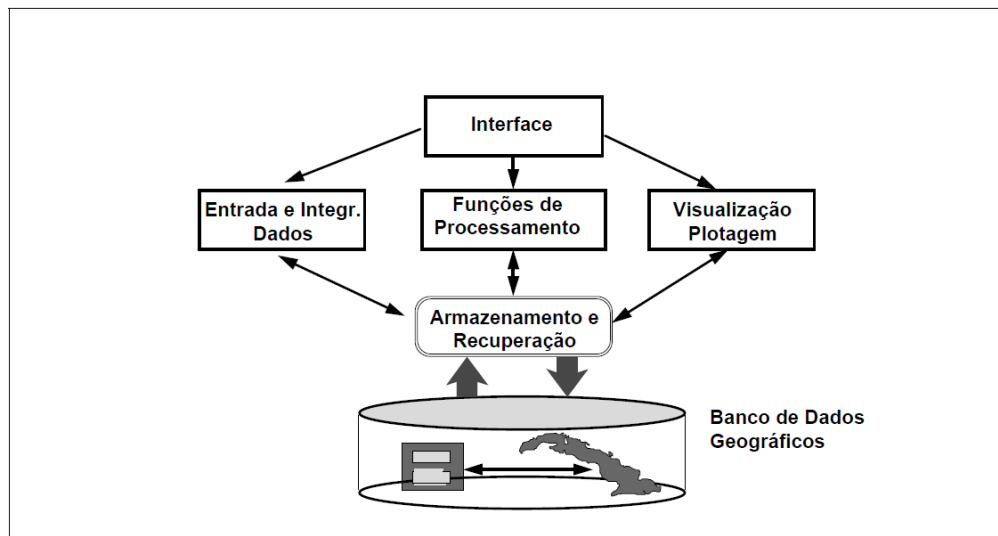
## **2.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG)**

Sistema de Informação Geográfica é, de acordo com Fitz (2008), um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido.

Ele pode ser dividido internamente conforme Figura 1.



Figura 1: Organização de um SIG



Fonte: Câmara (1996)

Numa visão geral, pode-se considerar que um SIG tem os seguintes componentes: interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento; visualização e impressão; e armazenamento e recuperação de dados. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos estão usualmente presentes em um SIG.

A interface mais utilizada atualmente é aquela baseada em menus, por serem mais fáceis de operar. Anteriormente se utilizava a linguagem de comandos, no entanto, a medida que o sistema vai crescendo em funcionalidade torna-se uma tarefa extremamente complexa com relação a operação, o que acaba por dificultar o seu uso.

Com relação a entrada de dados, podem ser distinguidos quatro tipos: entrada de dados via caderneta de campo, a digitalização em mesa, a digitalização ótica e a leitura de dados na forma digital, incluindo a importação de dados em outros formatos. Vale lembrar que na importação de dados digitais, é muito importante aproveitar o investimento já feito, eventualmente por outras instituições, na coleta e armazenamento de dados geográficos. No Brasil, as principais fontes de dados são as bases do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), do INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial) e do Centro de Cartografia Automatizada do Exército.

As funções de processamento são dependentes dos tipos de dados envolvidos. A análise geográfica engloba funções como superposição, ponderação, medidas

(área, perímetro), mapas de distância, tabulação cruzada, dentre outras. O processamento digital de imagens envolve funções como contraste, realce e classificação. Modelos numéricos de terreno permitem a geração de mapas de declividade e aspecto, cálculo de volumes, análise de perfis, além da própria geração do modelo a partir de pontos esparsos ou linhas, entre outras funções.

Os ambientes de visualização de um sistema são consequência do paradigma adotado para a interface. Quanto à produção cartográfica, alguns sistemas dispõem de recursos altamente sofisticados de apresentação gráfica, englobando a definição de uma área de plotagem, colocação de legendas, textos explicativos e notas de crédito. Já o aparecimento de padrões “de facto”, como o PostScript e o HPGL, vem para facilitar o desenvolvimento de funções de plotagem.

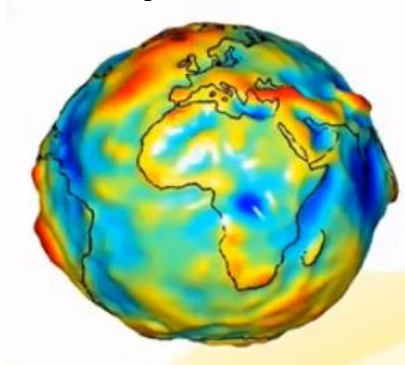
Os dados de um SIG são geralmente organizados sob a forma de um banco de dados geográficos. Tradicionalmente, os SIGs armazenam os dados geográficos em arquivos internos. Este tipo de solução vem sendo substituída pelo uso cada vez maior de SGBD. Estes componentes se relacionam de forma hierárquica. No nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída). No nível mais interno do sistema, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos.

## **2.5 Datum**

Antes de definir o que vem a ser um datum propriamente dito, é importante entender o significado de outros dois termos: geóide e elipsoide.

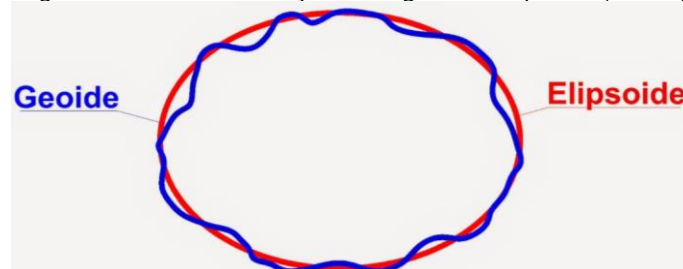
De acordo com Matos (2007) geóide é a superfície equipotencial do campo gravitacional da Terra que mais se aproxima do nível médio dos mares. Já elipsoide é superfície matemática que representa a superfície topográfica. Abaixo a Figura 2 e 3 representam ambos os conceitos.

Figura 2: Geóide



Fonte: INPE

Figura 3: Ponto de interseção entre geóide e elipsoide (Datum)



Fonte: INPE

Matos (2007) afirma que a forma e tamanho de um elipsoide, bem como sua posição relativa ao geóide define um sistema geodésico, também designado por datum. Ou seja, é o ponto, numa região, de uma melhor coincidência do elipsoide de referência ao geóide, onde o desvio vertical é nulo ou mínimo. Dessa forma, ele pode ser definido através de cinco parâmetros:

- Ponto do terreno
- Altura geoidal
- Elipsoide de referência
- Coordenadas astronômicas de cada ponto de partida
- Azimutes desses pontos

## 2.6 Imagens de Satélite

Imagem de satélite é um arquivo de imagem obtido por sensoriamento remoto a partir de um satélite artificial. Esse processo poderia ser explicado de

maneira simples como a obtenção de uma fotografia da Terra de uma máquina localizada no espaço dentro de um satélite.

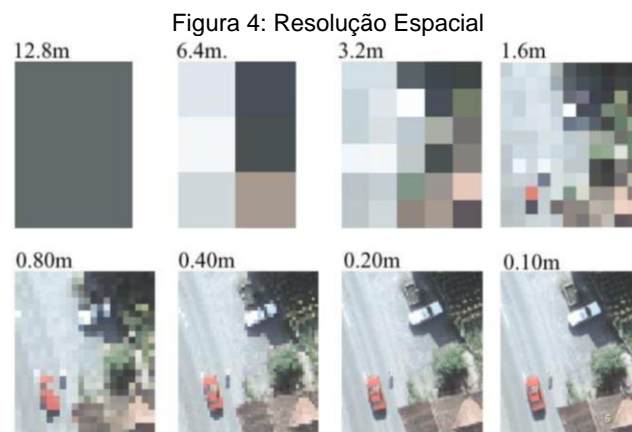
A aquisição de imagens de satélite pode ser realizada por meio da plataforma *Earth Explorer*, responsável por armazenar um banco de dados relativo a imagens satelitais, fotografias aéreas e outras informações de sensoriamento remoto, operado pelo *United States Geological Survey* (USGS), inclusive aquelas da série *Landsat*. Este trata-se de um satélite responsável pelo mapeamento multiespectral em alta resolução da superfície terrestre. Existem diversas versões, desde o *Landsat 1* até o 8.

## 2.7 Características das Imagens

As imagens de sensores remotos possuem estrutura matricial, onde seu elemento principal é denominado pixel, menor unidade de uma imagem digital. Quando se fala de imagem um conceito importante é o termo resolução, em sensoriamento remoto, pode ser atribuído a quatro diferentes parâmetros:

- Resolução Espacial:

Refere-se ao tamanho que este pixel representa na realidade. Vale ressaltar que para um mesmo sensor remoto cada pixel representa sempre uma mesma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra e quanto menor for o tamanho real deste pixel, maior será a resolução espacial desta imagem, o que significa que maior será a capacidade de registrar objetos dispostos na superfície terrestre, como ilustrado na Figura 4.



Fonte: INPE

No caso do Landsat 5, as bandas de 1 a 5 e 7 possuem resolução espacial de 30 m, enquanto a banda 6 possui resolução de 120 m. Já no Landsat 8 a banda pancromática e as 2 bandas do infravermelho termal possuem resolução espacial de 15 e 100 m respectivamente, enquanto as demais de 30 m.

- Resolução Espectral

Já a resolução espectral tem a ver com o número de bandas que os sensores existentes nos satélites conseguem discretizar. Como, por exemplo, o Landsat 5 que conta com sete bandas captadas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM), tendo cada uma a sua especificidade de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE):

- Banda 1 (azul) apresenta grande penetração em corpos d'água, sendo particularmente interessante para estudos batimétricos. Permite detalhar a turbidez da água. Boa para mapeamento de águas costeiras. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial.

- Banda 2 (verde) apresenta grande sensibilidade a presença de sedimentos em suspensão na água, sendo utilizada para estudos de qualidade d'água e mapeamento de correntes em corpos d'água. Tem boa penetração em corpos d'água. Boa para mapeamento de vegetação e áreas onde ocorrem atividades antrópicas.

- Banda 3 (vermelho) apresenta bom contraste entre áreas cobertas com vegetação e solo exposto, bem como discrimina diversos tipos de vegetação. É a banda mais utilizada para a delimitação das “manchas” urbanas e traçado do sistema viário. É adequada também para mapeamento de uso do solo, agricultura e estudos de qualidade d'água.

- Banda 4 (infravermelho próximo) apresenta bom contraste entre solo e corpos d'água, permitindo o mapeamento de rios de grande porte, lagos, lagoas, reservatórios e áreas úmidas. É também sensível a morfologia do terreno, sendo muito utilizada para mapeamentos de geologia e geomorfologia. Serve para mapear a vegetação que foi queimada e permite ainda a visualização de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas (por exemplo, aguapé). Banda muito sensível à absorção da radiação eletromagnética pelos óxidos de ferro e titânio, muito comuns nos solos tropicais muito intemperizados.

- Banda 5 (infravermelho médio) permite observar o teor de umidade nas plantas e detectar possíveis estresses na vegetação causados por falta de água. Utilizada também para obter informações sobre a umidade do solo, no entanto, pode sofrer perturbações se ocorrem chuvas um pouco antes de a cena ser imageada pelo satélite.

- Banda 6 (infravermelho termal) pode ser utilizada para mapeamento de estresse térmico em plantas, estudos de propriedade termal dos solos, mapeamento da temperatura de superfície de águas oceânicas superficiais, informações importantes para pesca e clima. Pode ser utilizada para estudos de ilhas urbanas.

- Banda 7 (infravermelho médio) apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, servindo para estudos nas áreas de geologia, solos e geomorfologia. Utilizada também para a identificação de minerais e detecção de umidade no solo e na vegetação.

Já o Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Terra Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Produtos OLI consistem de nove bandas multiespectrais, sendo duas delas uma novidade se comparadas as versões anteriores, a banda 1 (coastal aerossol) projetada especificamente para estudos dos recursos hídricos e investigação da zona costeira e a banda 9 projetada para observar nuvens de alta altitude (cirrus clouds), conforme *Science for a Changing World* (USGS). Há também o acréscimo de uma banda de garantia de qualidade (Banda QA) que apresenta informações sobre a presença de nuvens, água e neve. Vale lembrar que a banda 8 é a pancromática, ou seja, imagem obtida por um radiômetro capaz de registrar a energia eletromagnética numa única banda de frequências que inclui a maior parte da zona da luz visível. A partir do sensor termal TIRS foram criadas duas bandas espectrais para o comprimento de onda antes coberto por uma única banda nos sensores TM e ETM, sendo elas as bandas 10 e 11. Tais adições provocaram mudanças nos intervalos dentro do espectro dos canais de todas as bandas.

- Resolução Radiométrica

De acordo com Crosta (1993) cada pixel possui também um atributo Z, que indica o seu nível de cinza, que vai variar do preto ao branco. O nível de cinza representa a intensidade de energia eletromagnética (refletida/emitida) média medida

pelo sensor para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Cada sensor possui um limite de tons de cinza que consegue detectar e armazenar. Este limite é mensurado em bits. Como os computadores utilizados para este propósito possuem um sistema binário, o número de tons de cinza que o sensor conseguirá captar sempre será igual ao sistema elevado ao número de bits. No caso do Landsat 5 será 2 elevado ao número de bits do sensor, sendo que ele possui sensores de 8 bits, por isso sua resolução radiométrica será de  $2^8$ , o que corresponde a 256 níveis de cinza. Já o Landsat 8 possui sensores de 16 bits, logo 65.536 níveis de cinza. Quanto maior o número de bits, maior o poder de contraste e de discriminação das imagens, inclusive nas áreas de sombra.

- Resolução Temporal

O Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) define resolução espacial como a frequência de passagem do sensor em um mesmo local, em um determinado intervalo de tempo. Tanto o Landsat 5 quanto o 8 demoram 16 dias revisitar a mesma região.

O Quadro 2, logo abaixo, mostra um resumo das características dos dois satélites listados anteriormente.

Quadro 2: Características dos satélites Landsat-5 e Landsat-8

Características	SATÉLITE LANDSAT-5	SATÉLITE LANDSAT-8
	Sensor	Sensores
	Thematic Mapper (TM) Bandas 1 a 7	Operational Land Imager (OLI) Bandas 1 a 9 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Bandas 10 e 11
Largura de Faixa	170x185 Km	170x185 Km
Bandas Espectrais / Resolução Espacial	Banda 1 Blue (0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 2 Green (0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 3 Red (0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 4 Near Infrared NIR (0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 5 Mid-Infrared (1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 6 Thermal (10,4 - 12,5 $\mu\text{m}$ ) - 120 m Banda 7 Mid-Infrared (2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$ ) - 30 m	Banda 1 Coastal aerosol (0,43 - 0,45 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 2 Blue (0,45 - 0,51 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 3 Green (0,53 - 0,59 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 4 Red (0,64 - 0,67 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 5 Near Infrared NIR (0,85 - 0,88 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 8 Panchromatic (0,50 - 0,68 $\mu\text{m}$ ) - 15 m Banda 9 Cirrus (1,36 - 1,38 $\mu\text{m}$ ) - 30 m Banda 10 Thermal Infrared TIRS 1 (10,6 - 11,19 $\mu\text{m}$ ) - 100 m Banda 11 Thermal Infrared TIRS 2 (11,5 - 12,51 $\mu\text{m}$ ) - 100 m
Resolução Radiométrica	8 bits	16 bits
Projeção	UTM, Datum SIRGAS 2000	UTM, Datum SIRGAS 2000
Revisita	16 dias	16 dias
Órbita	Heliossíncrona (altitude de 705 Km)	Heliossíncrona (altitude de 705 Km)

Fonte: United States Geological Survey (USGS) modificado

## 2.8 Processamento Digital de Imagens

Por Processamento Digital de Imagens (PDI) entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação. O processamento permite gerar produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996).

Conforme Silva (2001), a função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contida nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas dedicados de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

O processamento de imagens pode ser dividido em três etapas: pré-processamento, realce e classificação.

- Pré-processamento: refere-se ao processamento inicial de dados brutos para calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruído.
- Realce: visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem.
- Classificação: aonde são atribuídas classes aos objetos presentes na imagem.

## 2.9 Spring

O Spring é um *software* livre e um SIG com função de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Ele é um projeto do INPE/DPI em parceria com outras empresas e órgãos governamentais. A versão 5.3 do Spring conta com todas as ferramentas necessárias para a execução plena do projeto, desde a montagem da base de dados até as operações cartográficas realizadas.



## 2.10 Mapa de Ameaça gerado por George Azevedo no RiskLab

O RiskLab (Risk-Landslide-Laboratory) trata-se de um *software* desenvolvido por George Azevedo como defesa da sua tese de doutorado na Universidade de Brasília (2013), a fim de calcular o risco vinculado a eventos de escorregamentos rasos em uma determinada área de estudo baseando-se em informações relevantes do meio físico.

A metodologia aplicada por Azevedo et al. (2013) consistiu na conjugação do modelo SLIDE, proposto por Liao et al. (2010), e o método probabilístico FOSM (First Order Second Moment). O modelo SLIDE, o qual se baseia nos trabalhos de Fredlund et al. (1996) e Montrasio e Valentino (2008), corresponde a aplicação de um modelo de estabilidade de talude infinito capaz de incorporar a ação da precipitação na resistência ao cisalhamento dos solos e fornecendo o fator de segurança (FS) da encosta pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{\cot\beta \cdot \tan\phi' \cdot [\Gamma + m \cdot (n_w - 1)] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w} \quad [2]$$

onde  $\beta$  é o ângulo de inclinação do talude e  $\phi'$  refere-se ao ângulo de atrito efetivo do solo, ambos expressos em graus. Destacam-se, ainda, as funções integrantes deste fator nas equações seguintes:

$$\Gamma = G_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r \quad [3]$$

$$n_w = n(1 - S_r) \quad [4]$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin(2\beta) \cdot H \cdot \gamma_w} \quad [5]$$

Nestas fórmulas,  $G_s$  é o peso específico relativo dos sólidos do solo (adimensional),  $n$  relaciona-se à porosidade (em porcentagem),  $S_r$  é o grau de saturação (em porcentagem),  $H$  é a espessura do solo considerada como instável (em metros), uma vez que o modelo não considera, necessariamente, a superfície de ruptura coincidente com o contato entre solo e rocha. Já  $\gamma_w$  corresponde ao peso específico da água, igual a 9800 N/m<sup>3</sup>. Na expressão para o fator de segurança,  $C'$

representa a coesão total, que inclui a presença da coesão efetiva e da coesão aparente, esta última ligada à matriz de sucção indicada por Fredlund et al. (1996). A coesão total é dada pela equação abaixo:

$$C' = [c' + c_\phi]. \Delta s = [c' + A. (1 - \lambda. m^\alpha)]. \Delta s \quad [6]$$

onde  $c'$  corresponde à coesão efetiva (em Pa) e  $\Delta s$  é tomado como comprimento unitário do talude.  $A$  representa um parâmetro dependente do tipo de solo e do pico da tensão cisalhante na ruptura (Pa),  $\lambda$  é um coeficiente de intensidade relacionado ao tipo de solo e  $\alpha$  mostra-se como um parâmetro que retrata a tendência não linear da curva de coesão, sendo as duas últimas variáveis adimensionais. Conforme Montrasio e Valentino (2008), o parâmetro  $m$  está ligado à espessura adimensional da parte saturada pertencente à camada, variando entre 0 e 1. A espessura da camada saturada (mH) está diretamente ligada à intensidade da precipitação. Liao et al. (2010) define a grade composta pelo talude infinito como um tanque de equilíbrio hídrico que leva em consideração, de maneira simultânea, tanto o ganho de água pela infiltração das chuvas, quanto a sua perda em virtude do escoamento e da evapotranspiração através do elemento do talude. Segundo ainda Liao et al. (2010), testes de determinação do nível do lençol freático para o estabelecimento do valor inicial de  $m$  podem ser utilizados. As equações seguintes são, então, aplicadas para o cálculo do balanço hídrico em cada passo de tempo requerido pelas análises:

$$m_1 = 0 \quad [7]$$

$$O_t = K_t. \sin(\beta). m_t. H. \cos(\beta). \Delta t \quad [8]$$

$$\Delta m_t = \frac{(I_t - O_t)}{n. H. (1 - S_r)} \quad [9]$$

$$m_{t+1} = m_t + \Delta m_t \quad [10]$$

Nestas equações, o índice  $t$  refere-se ao passo de tempo,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo, em segundos,  $m_1$  corresponde ao valor inicial de  $m$  e  $m_t$  relaciona-se ao valor calculado em cada iteração de tempo.  $O_t$  representa a saída de água de uma porção finita para um talude de comprimento finito  $L$ . A intensidade da chuva por unidade de

tempo é dada por  $I_t$ , em mm, sendo posteriormente transformada para metros, enquanto que capacidade global de drenagem, decorrente da permeabilidade intrínseca do solo e da existência de numerosos caminhos preferenciais de fluxo, corresponde ao termo  $K_t$ , dado em 1/s. O modelo proposto fornece originalmente ao final da sua execução, o valor do fator de segurança para os taludes analisados, criando o mapeamento deste indicativo de estabilidade.

A aplicação do método FOSM ao modelo de estabilidade de taludes permite que seja criada a distribuição de probabilidade do fator de segurança a partir das distribuições estatísticas das variáveis independentes que compõem o FS. Azevedo et al. (2013) utilizaram como variáveis independentes para a avaliação a coesão e o ângulo de atrito do solo. A probabilidade de ruptura é definida, a partir da curva de probabilidade de fator de segurança, como a área dessa função que se encontra a esquerda do fator de segurança igual a 1. Mais detalhes da aplicação do método FOSM em análises de estabilidade de taludes utilizando SIG podem ser encontrados em Azevedo et al. (2017).

Destaca-se que os dados de chuva simulados por Azevedo et al. (2013) consistiram nos quatro meses iniciais da estação chuvosa no Distrito Federal, de setembro a dezembro, com base em dados históricos da Agência Nacional de Água, correspondendo a um período inicial de 1971 a 2007 e um segundo, a partir de junho de 2009 até julho de 2011. O procedimento foi realizado para todas as células componentes da área de estudo, resultando no cálculo da probabilidade de ruptura para cada porção do terreno. Para fins de comparação com a classificação das áreas urbanas, foi utilizada a configuração de probabilidade de ruptura mais desfavorável, relativa ao mês de dezembro.

Com relação as características físicas da área de estudo, observa-se a presença de quatro tipos pedológicos distintos, conforme a classificação fornecida por Reatto (2004). As propriedades destes solos foram, então, determinadas a partir de trabalhos pertinentes na literatura técnica. Definiram-se os valores de  $c'$  e  $\phi'$  por meio da pesquisa de Roque & Souza (2008), enquanto que se obtiveram as características  $S_r$ ,  $n$ ,  $G_s$  e  $K_t$  por intermédio de Castro (2011). Já os parâmetros,  $\lambda$  e  $\alpha$ , foram retirados do trabalho de Montrasio & Valentino (2008). Dados estes, explícitos na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de solos associados aos valores dos respectivos parâmetros característicos

Solo	Parâmetros do solo									
	c'	$\phi$	H	Kt	Gs	n	Sr	A	$\lambda$	$\alpha$
	KA	°	m	l/s	–	%	%	–	–	–
Latossolo vermelho	10	20	2	$10^{-6}$	2,8	0,6	0,4	100	0,4	3,4
Latossolo vermelho amarelo	10	20	2	$10^{-7}$	2,8	0,5	0,6	100	0,4	3,4
Gleissolo háplico	20	10	3	$10^{-9}$	2,7	0,4	0,95	80	0,4	3,4
Cambissolo háplico	5	25	0,7	$10^{-8}$	2,7	0,3	0,6	100	0,4	3,4

Fonte: Reatto (2004), Roque & Souza (2008) e Castro (2011) modificado

Como o RiskLab foi criado com base em linguagem de programação, utilizando como apoio o *software* Matlab, então fez-se necessário passar esses parâmetros do solo para uma linguagem que fosse entendida pelo programa. Sendo assim, o autor importou esses dados para o Spring. Primeiramente criou-se um banco de dados e um projeto na plataforma SIG com o objetivo de gerar novos dados a partir do grupo primário de informações, em que posteriormente estes foram exportados em formato matricial e com resolução adequada para o cálculo do risco.

Após feito todo o procedimento, Azevedo et al. (2013) importou os dados para o RiskLab o que gerou como produto final o mapa de ameaça para um evento deflagrante de chuva.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Setor Habitacional Sol Nascente foi apontado como a maior favela do Distrito Federal e a segunda maior do país pelo censo 2010 do IBGE, na região havia 56,5 mil moradores e esse número só foi crescendo com o decorrer do tempo. Na época, o Sol Nascente estava abaixo somente da favela Rocinha, no Rio de Janeiro, em número de habitantes.

Essa condição de crescimento indiscriminado tem uma relação direta com os problemas de falta de infraestrutura básica e baixos indicadores sociais. A expansão urbana sofrida deve-se em parte pela ação de grileiros que ocupam irregularmente áreas para vendê-las posteriormente. Associado a isso, há a falta de saneamento básico, ausência de coleta de lixo e os altos índices de criminalidade.

O Sol Nascente é dividido em três trechos. Segundo a AGEFIS (Agência de Fiscalização do Distrito Federal), o trecho I abrange uma área de 225,046 hectares, o II, 300,73 hectares, e o III, 378,09 hectares. Os três trechos tiveram os limites definidos nos Projetos Urbanísticos de Regularização Fundiária, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Mapa do Setor Sol Nascente dividido em três trechos



Fonte: G1 (2015)

## 4 METODOLOGIA

No sentido de se obter a tendência de crescimento das áreas urbanas, a metodologia empregada no presente trabalho contemplou a execução do processamento digital de duas imagens advindas de satélites, referentes às datas de 8 de julho de 2011 e 12 de outubro de 2017. A primeira foi captada pelos sensores presentes no satélite Landsat-5, enquanto a segunda refere-se ao Landsat-8. A seguir, encontram-se as etapas desenvolvidas na pesquisa.

### 4.1 Processamento Digital de Imagens

A aquisição das imagens de satélite foi realizada por meio da plataforma *Earth Explorer*, responsável por armazenar um banco de dados relativo a imagens satelitais, fotografias aéreas e outras informações de sensoriamento remoto, operado pelo United States Geological, inclusive aquelas da série Landsat.

As cenas fornecidas pelos satélites abrangem toda a área do Distrito Federal, de forma que se fez necessária a delimitação da área de interesse no ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). Desta forma, foram criados, inicialmente, um banco de dados e um projeto no *software* SPRING 5.5 (Câmara et al., 1996) específicos para esta pesquisa e voltados para a estruturação das informações espaciais essenciais para a elaboração das análises. Destacam-se as seguintes informações referentes às principais características deste projeto:

- Projeção e datum utilizados: UTM/ SIRGAS2000, zona 23;
- Retângulo envolvente estabelecido em coordenadas planas:

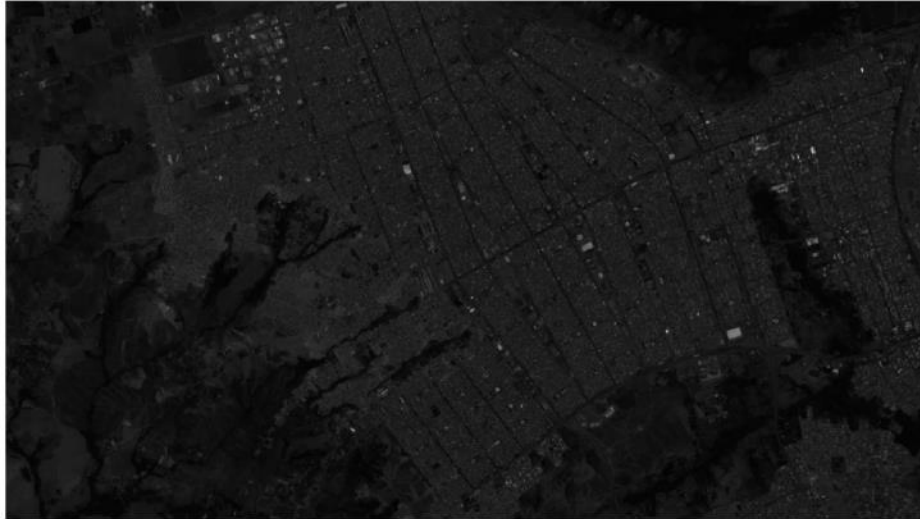
X1 = 159.200 m; Y1 = 8.244.401 m;

X2 = 172.812m; Y2 = 8.252.045 m;

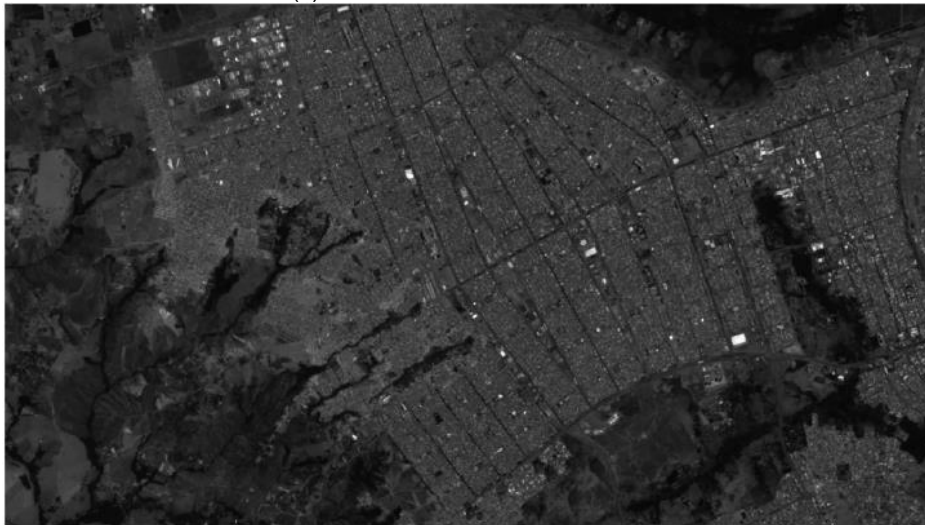
Em um procedimento inicial, essas imagens foram melhoradas através de um processo empregado nas suas bandas, conhecido como realce linear de contraste. Essas operações pretendem melhorar a qualidade visual da imagem, modificando os seus níveis de cinza. Para isso, manipula-se o histograma (distribuição estatística dos níveis de cinza) original, distribuindo melhor os valores digitais da imagem. Percebe-

se que com a distribuição do histograma, a imagem se torna mais nítida. Amplia-se assim, a obtenção e a interpretação das informações contidas nas imagens, conforme mostrado na Figuras 6.

Figura 6: Landsat 8 - (a) Banda 8 sem realce



(b) Banda 8 com realce linear de contraste



Além disso, para melhor aproveitamento das informações produzidas pelos diferentes sensores, outros métodos de processamento de imagens foram aplicados, como por exemplo, a transformação  $RGB \leftrightarrow IHS$ . A cor de um objeto em uma imagem pode ser representada pelas intensidades das componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B), no sistema de cores RGB, ou pela intensidade (I), pela cor ou matiz (H) e pela saturação (S) no espaço IHS. A transformação RGB em IHS permite descrever a amplitude de possíveis variações na tonalidade das cores. Além disso,

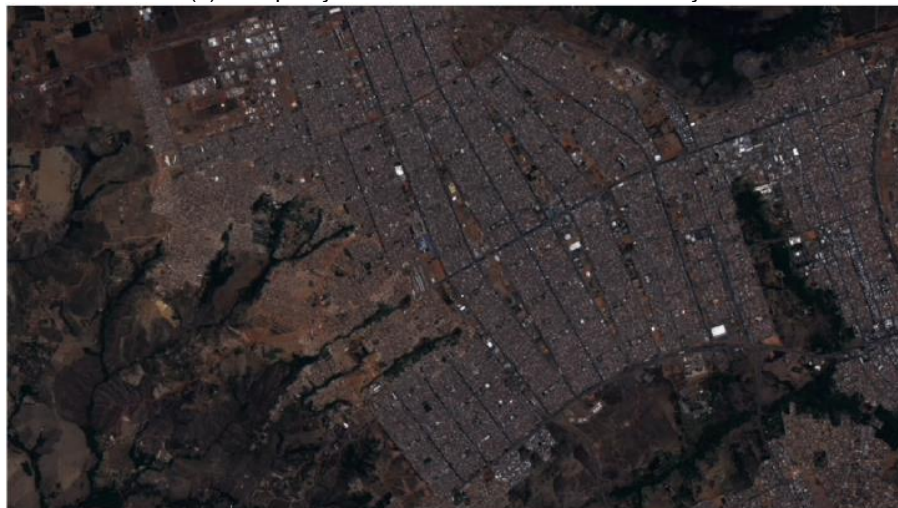


intensidade, matiz e saturação são parâmetros independentes, ou seja, podem ser analisados separadamente, permitindo um melhor ajuste das cores às características do sistema visual. Como resultado, a transformação de volta de IHS para RGB produz uma imagem com maior resolução espacial em relação a uma composição colorida entre as bandas originais. Isso pode ser observado na comparação entre as Figura 7(a) e 7(b).

Figura 7: Landsat 8 - (a) Composição colorida RGB



(b) Composição colorida RGB com Transformação



Existem, ainda, dois importantes componentes que fazem uma grande diferença no processamento de imagens: vegetação e água. Para que pudesse ser feita uma melhor análise destes elementos, foram efetuados os cálculos do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI). O primeiro é um índice que analisa a condição da vegetação no campo por meio de sensoriamento remoto, tendo como objetivo o realce da vegetação



em detrimento dos outros atributos de imagem. É obtido por operações matemáticas dos valores de refletância nas bandas do espectro eletromagnético correspondentes ao vermelho (R) e ao infravermelho (IR). Já o segundo mede o teor de umidade da vegetação. Ele é calculado através da refletância do infravermelho próximo e médio, correspondente às bandas 5 e 6, respectivamente, do Landsat 8. Ambos são apresentados na Figura 8.

Figura 8: (a) NDVI



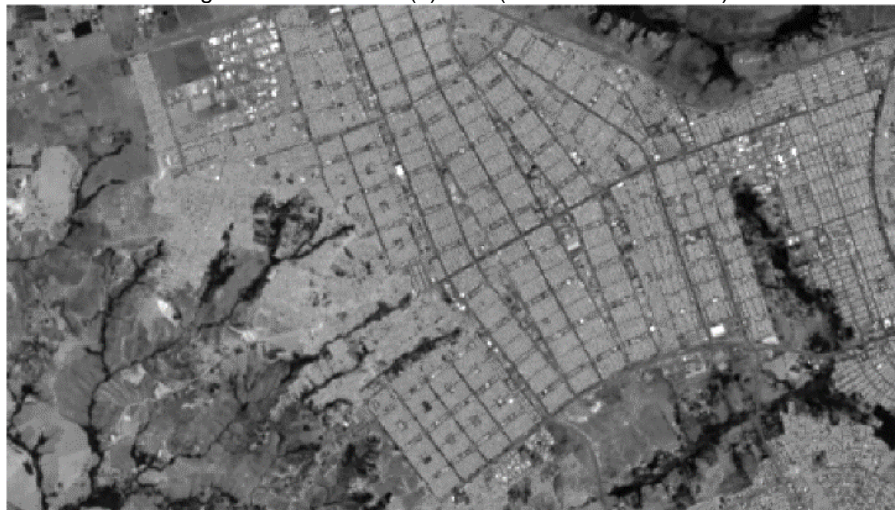
(b) NDWI



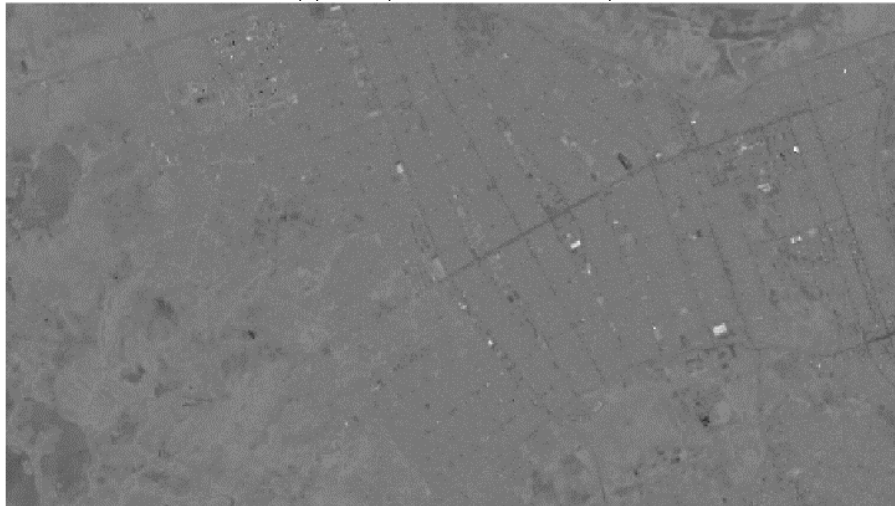
Na Figura 8 (a), os lugares mais claros representam áreas com menor quantidade de vegetação, enquanto as áreas mais escuras representam áreas com uma vegetação mais abundante. Na Figura 8 (b) os lugares mais escuros representam áreas com menor quantidade de umidade, enquanto as áreas mais claras representam áreas mais úmidas. Nota-se que os lugares mais úmidos correspondem a regiões em que se encontra a vegetação.

Também foram geradas as componentes principais. Esse processo tem o intuito de remover as redundâncias espectrais que possam existir nas imagens utilizadas. Isso significa que as componentes principais produzidas são novas imagens cujos resultados apresentam informações não disponíveis em outras bandas. Com as bandas de número 2 a 7 do Landsat 8 e os índices NDVI e NDWI, todos realçados, foram compostas as componentes principais da área de estudo. Dois deles estão representados na Figura 9.

Figura 9: Landsat 8 - (a) PC1 (Banda de 30 metros)



(b) PC2 (Banda de 30 metros)

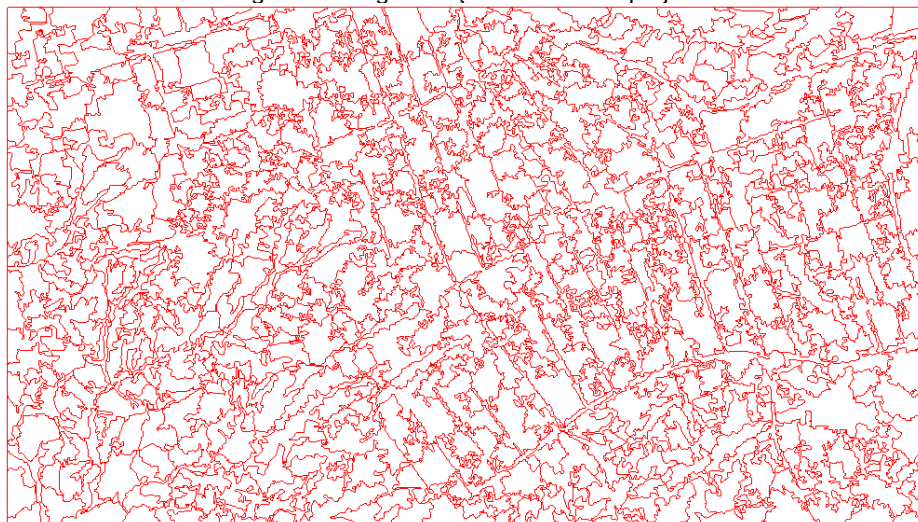


Nota-se que o PC1 tem uma melhor qualidade no que diz respeito a visão humana e o PC2 tem a pior qualidade, no entanto para o Spring, ambas fornecem características importantes.

Depois de todo o trabalho para melhorar a qualidade das imagens e das informações contidas nelas, foram feitas segmentações por crescimento de regiões de um grupo de imagens pré-selecionadas. Esse procedimento rotula cada pixel como uma região distinta, agrupando os territórios adjacentes com características similares. Quanto maior o número de similaridades, mais dividida ficará a imagem.

Primeiramente a tentativa de segmentação foi com todas as bandas de 30 metros, incluindo PC1, PC2, PC3, NDVI e NDWI citados anteriormente, com grau de similaridade 30 e tamanho do pixel 200. Um segundo teste foi com as bandas de 15 metros incluindo a transformação RGB, com grau de similaridade 30 e tamanho do pixel 300, dentre diversas outras experiências. No entanto, a segunda opção foi a que melhor se encaixou ao projeto, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Segmentação utilizada no projeto



Logo em seguida, iniciou-se o processo de classificação. Segundo o manual do Spring, o método de classificação de imagens é um processo de extração de informações de imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos e utilizá-los em sensoriamento remoto para o mapeamento de superfícies. Pode ser realizada de quatro maneiras: pixel a pixel, por regiões, supervisionada e não supervisionada. Cada uma delas é baseada em diferente conceito de classificação.

- a) Pixel a pixel: informação espectral de cada pixel individualmente;
- b) Por regiões: informação do pixel e também da vizinhança;
- c) Supervisionada: realização de treinamento prévio para atribuição de classes;

d) Não supervisionada: classificação eletrônica que necessita de posterior atribuição de classes.

Nesse projeto, a classificação que apresentou um melhor resultado foi a supervisionada por regiões, ou seja, algumas regiões foram previamente classificadas em urbana e não urbana e o algoritmo do *software* Spring as agrupou por similaridade. O tipo de classificador utilizado foi o Bhattacharya, com limiar de aceitação de 99%.

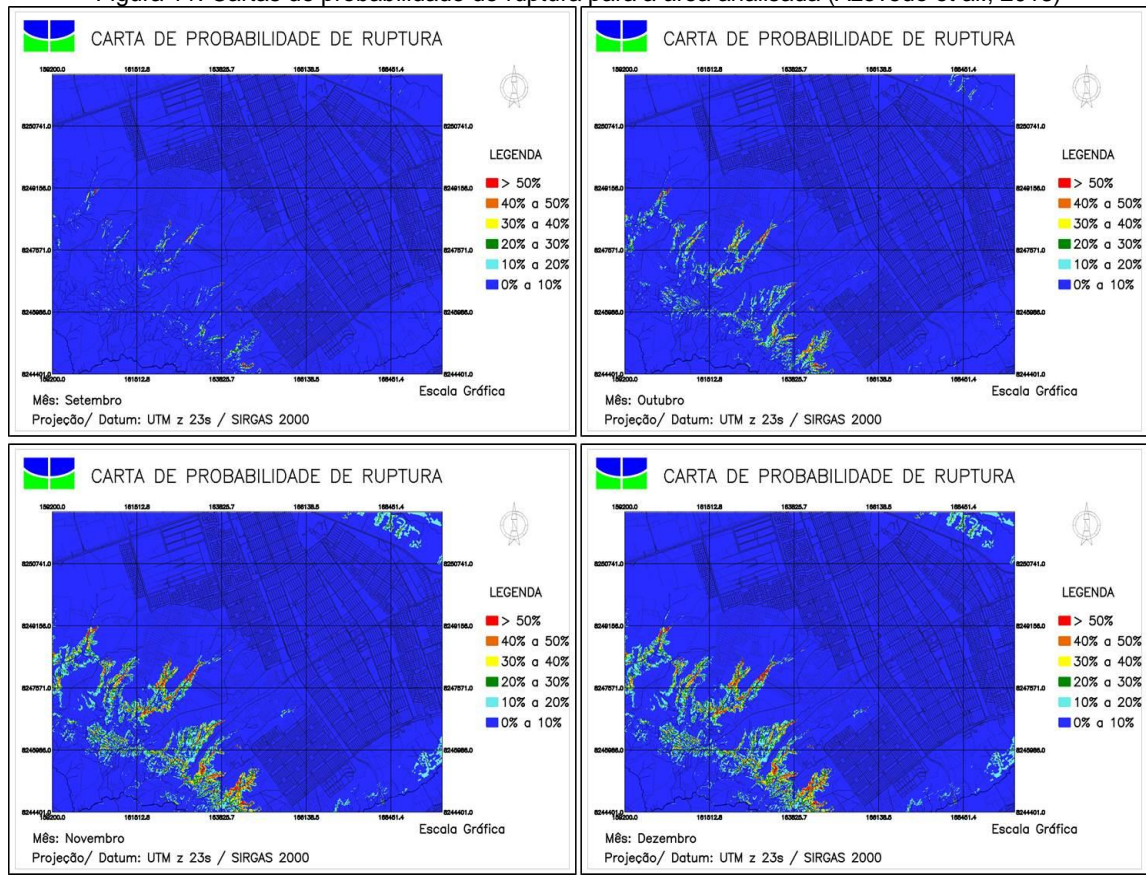
No que se refere ao processamento digital das imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, os procedimentos foram os mesmos, chegando às duas classificações.

#### **4.2 Avaliação de ameaça em termos de probabilidade de ruptura**

Uma vez estabelecidas as classificações para as duas datas escolhidas, fez-se necessário observar se a expansão urbana se processou em direção a áreas com potencial de ameaça de ocorrência de deslizamentos. Para tanto, utilizou-se os resultados obtidos no trabalho de Azevedo et al. (2013), onde foram geradas cartas de ameaça para a região em estudo em termos de probabilidade de rupturas das vertentes, explicitadas da Figura 11.



Figura 11: Cartas de probabilidade de ruptura para a área analisada (Azevedo et al., 2013)



Exportou-se esse plano de informação para o Spring e cruzou as informações contidas nele, com aquelas referentes a cada classificação respectivamente.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Como resultados iniciais obtiveram-se as classificações das imagens de 08 de julho de 2011 e 10 de outubro de 2017 em áreas urbanas e não urbanas, mostradas nas Figuras 12 e 13.

Figura 12: Classificação com base na imagem de 2011

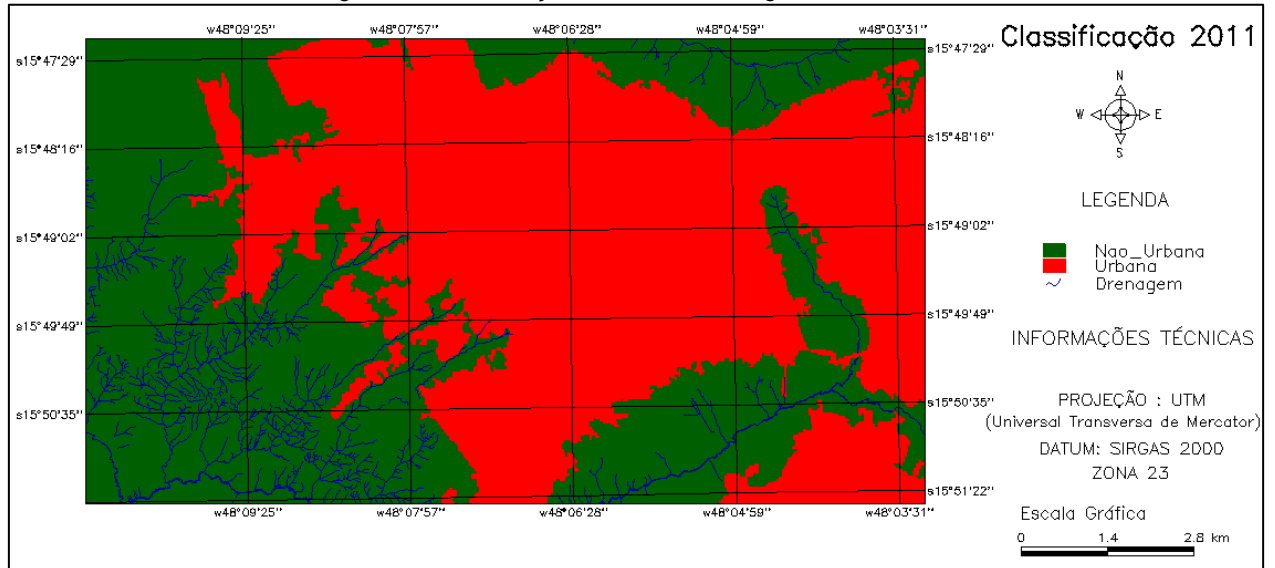
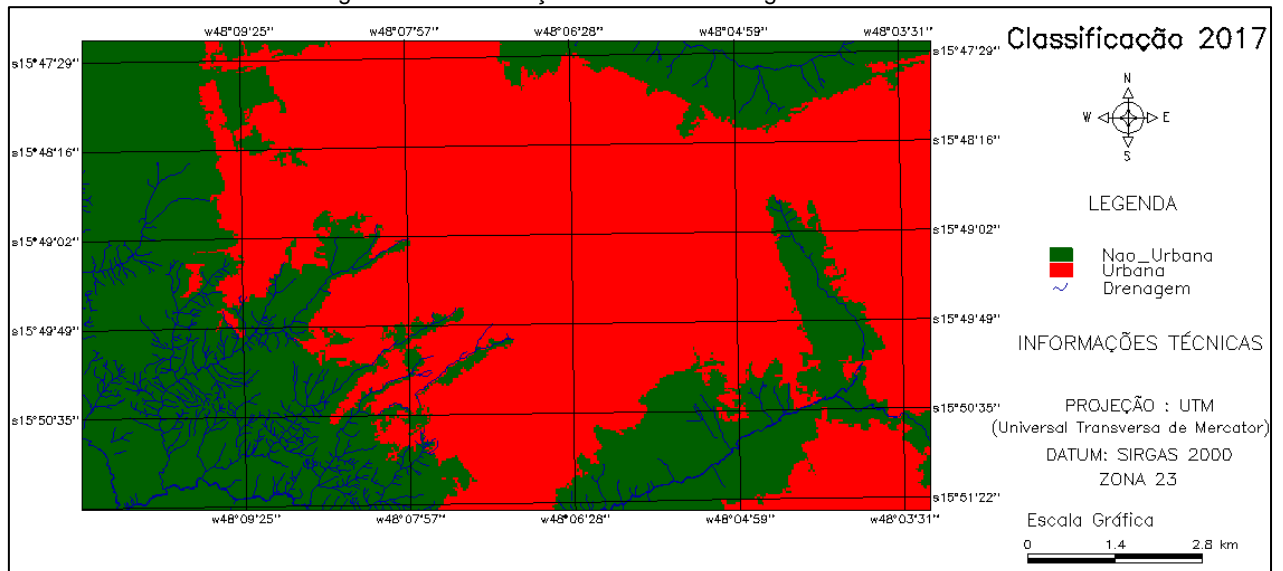


Figura 13: Classificação com base na imagem de 2017



Nas figuras, a área em vermelho representa a região urbana e em verde, não urbana. Nota-se um aumento significativo da área urbana entre as duas datas, fato constatado pelos dados explicitados na Tabela 2, oriundos da medida de classe presente efetuada nos respectivos planos de informação.

Tabela 2: Classificação da área de estudo nas datas analisadas.

Ano	Área Urbana (Km <sup>2</sup> )	Área Não Urbana (Km <sup>2</sup> )
2011	56,06	55,12
2017	59,37	51,81

Pelos dados apresentados, houve um crescimento de aproximadamente 3,3 km<sup>2</sup> em 6 anos, que corresponde a um aumento de 5,90% em relação ao ano de 2011. Nota-se, pelas Figuras 12 e 13, que regiões que se encontram construídas em 2011 foram categorizadas em não urbana em 2017. Por se tratar de um assentamento constituído essencialmente por construções irregulares, muitas vezes tais moradias estão sujeitas a demolições executadas pelo poder público, sob ações de desocupação promovidas pela AGEFIS. Esses espaços podem ser devido a tal mobilização, seja por estar invadindo territórios de preservação ou de riscos naturais, dentre diversas outras explicações. Há possibilidade de casos em que o algoritmo de classificação possa ter considerado algumas áreas de solo exposto como regiões com edificação, fato constatado a partir de uma averiguação com base em imagens de satélite disponíveis no *Google Earth* com resolução espacial maior em alguns pontos onde essa tendência foi observada.

No entanto, no panorama geral prevalece o aumento da urbanização de forma significativa e desordenada. Fez-se, então, necessário avaliar se essa expansão começou a atingir locais que apresentam ameaça de ocorrência de eventos relacionados a deslizamentos. Para isso, foi utilizada a ferramenta de tabulação cruzada entre o plano de informação de probabilidade de ruptura, obtido por meio do trabalho de Azevedo et al. (2013), e aqueles relacionados a cada uma das classificações. Os resultados encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Áreas urbanas e não urbanas para 2011 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura

	0% a 10%	10% a 20%	20% a 30%	30% a 40%	40% a 50%	Maior que 50%
Urbana (km <sup>2</sup> )	56,0510	0,0036	0,0009	0,0036	0	0,0009
Não urbana (km <sup>2</sup> )	52,12	1,69	0,72	0,35	0,18	0,06

Tabela 4: Áreas urbanas e não urbanas para 2017 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura

	0% a 10%	10% a 20%	20% a 30%	30% a 40%	40% a 50%	Maior que 50%
Urbana (km <sup>2</sup> )	59,35	0,012	0,002	0	0,0009	0,0009
Não urbana (km <sup>2</sup> )	48,81	1,69	0,72	0,35	0,18	0,06

Verifica-se que a maior parte das construções estão localizadas em áreas que possuem uma probabilidade de ruptura entre 0% e 10% (classe de menor ameaça

registrada) para ambas as datas. Quando se passa do ano de 2011 para 2017, a área associada a região urbana encontra-se distribuída por porcentagens maiores de probabilidade de ruptura, ratificando a tendência de expansão para locais com maior potencial de ocorrência de movimentos de massa. O crescimento mais expressivo se deu na faixa de menor ameaça, 5,88%. A área não urbana, exceto para a classe de 0% a 10% de probabilidade de ruptura, apresentou uma constância na distribuição das áreas.

Visualmente, é possível averiguar que, mesmo havendo o aumento da ocupação urbana predominantemente em áreas com baixa ameaça (0% a 10%), esse crescimento está direcionado e aproxima-se dos pontos mais críticos segundo o modelo de estabilidade de taludes, conforme exposto nas Figuras 14 e 15.

Figura 14: Configuração da probabilidade de ruptura frente a ocupação urbana em 2011.

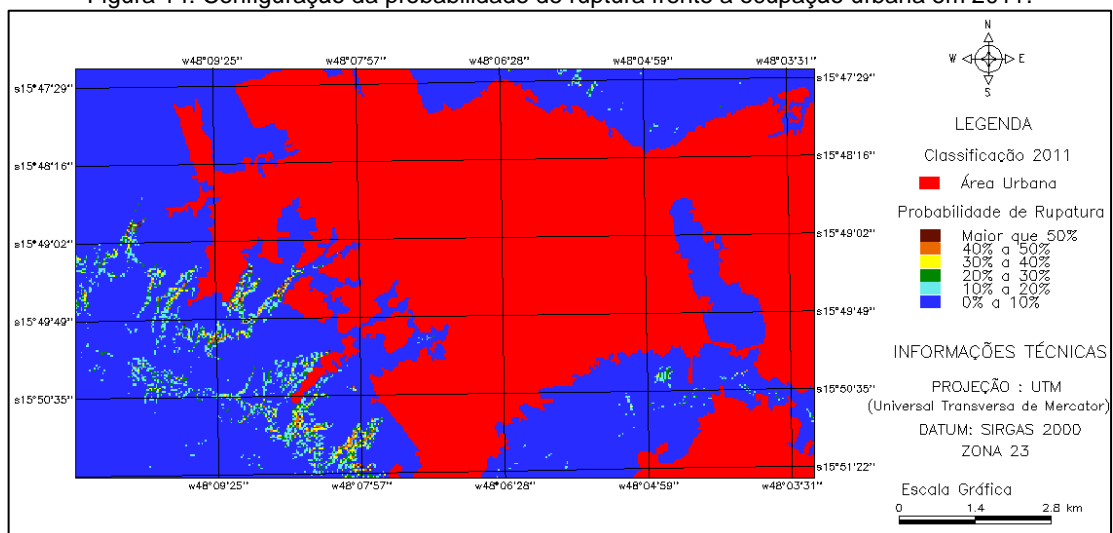
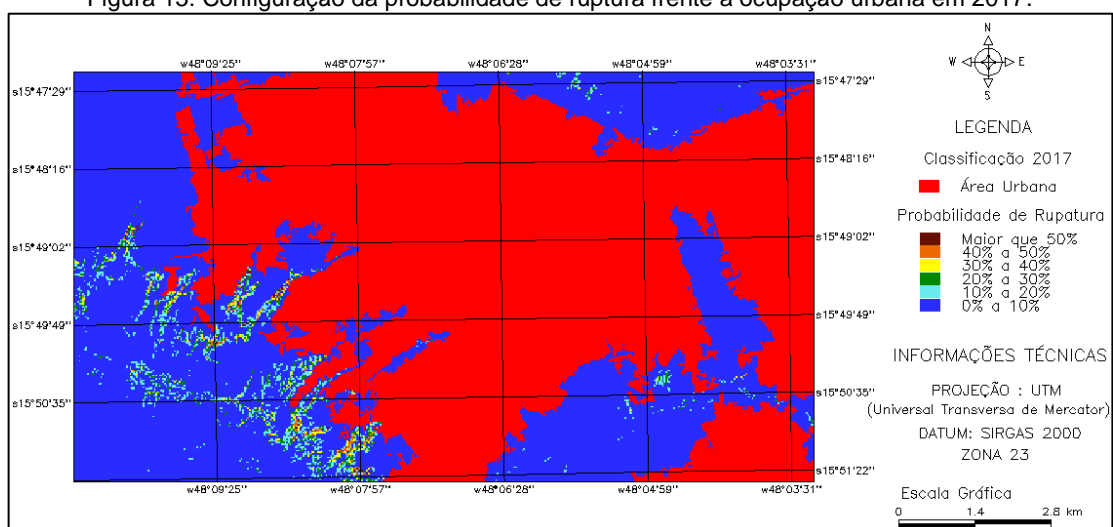


Figura 15: Configuração da probabilidade de ruptura frente a ocupação urbana em 2017.





O que acontece é que, diante da falta de espaços mais aptos para a execução de construções, com um relevo menos movimentado, a população tende a executar suas moradias nos locais ainda disponíveis, exatamente aqueles próximos de vertentes e córregos, sujeitos a um maior grau de ameaça e tornando-se vulneráveis.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre os resultados da classificação para as imagens dos anos de 2011 e 2017 permitiu averiguar claramente o crescimento indiscriminado no setor habitacional Sol Nascente que corresponde a 5,90%.

Apesar dos resultados da tabulação cruzada, entre os planos de informação da probabilidade de ruptura e da classificação das áreas urbanas nas datas avaliadas, não mostrarem um crescimento nítido de regiões ocupadas em valores elevados de ameaça de ocorrência de deslizamento, a tendência observada quando se analisa o aumento urbano de 2011 para 2017 é que este se deu exatamente na direção dos pontos com maiores níveis de ameaça. Esta conclusão torna-se de extrema importância para os órgãos competentes que monitoram as áreas de risco do Distrito Federal. É de se esperar que, caso esta tendência não seja interrompida pelo poder público, no sentido de coibir novas ocupações, surjam mais pontos categorizados com risco no condomínio Sol Nascente.

Finalmente, enfatiza-se que avaliações dessa natureza, principalmente em regiões que correspondem a ocupações irregulares, tal como o condomínio Sol Nascente, fornecem um melhor nível de compreensão do fenômeno da dinâmica associada ao crescimento urbano. Isso contribui para a tomada de decisão tanto do ponto de vista do planejamento territorial, como na implementação de um sistema de ordenamento urbano para essa localidade ou para futuras cidades. A comparação de um cenário de probabilidade de ruptura com a situação da malha urbana mostra-se como mais um elemento para análise dos possíveis impactos nos elementos em risco de uma determinada região, contribuindo para a avaliação da vulnerabilidade da população envolvida.

Por fim, ressalta-se que esse estudo apresenta uma metodologia clara, rápida e de baixo custo que pode ser facilmente replicada em outras localidades, podendo servir como base para posteriores pesquisas em termos de planejamento urbano e análises ambientais para regiões com ocupação urbana sujeitas a eventos de movimentos de massa.

## 7 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, são feitas as seguintes sugestões para futuras pesquisas:

- Em vez de utilizar dados de referências teóricas para os parâmetros do solo, fazer ensaios e obter resultados próprios.
- Elaboração de uma proposta para intervenção e mitigação dos riscos para essas áreas do Sol Nascente.
- Utilizar o *software* RiskLab para fazer a análise de ameaça em uma outra região que tenha maiores riscos de deslizamentos, como por exemplo no Rio de Janeiro, servindo como base para a intervenção governamental.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, G.F. (2015) - Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 430 p.

AZEVEDO, G.F., CARVAJAL, H.E.M. e SOUZA, N.M. (2013) – Uso do método FOSM para quantificação do perigo associado a deslizamentos deflagrados por chuvas no Distrito Federal. COBRAE 2013, Angra dos Reis, Brasil, pp. 490-497.

AZEVEDO, G.F., CARVAJAL, H.E.M., REBOLLEDO, J.F.R. e SOUZA, N.M. (2017) – Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Probabilistic Methods. EJGE, vol. 22, pp. 1-17.

BLOOM, A.L. (1988). Superfície da Terra. Edgard Blücher, São Paulo, SP, 184 p.

CÂMARA, G., CASANOVA, M. A., MAGALHÃES, G. C., HEMERLY, A. S., MEDEIROS, C.M.B. (1996). Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica, 205p.

CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J. e MITSUO, F. (1996) - Spring: integrating remote sensing and gis by object oriented data modeling. Computers & Graphics, vol. 20, pp. 395-403.

CALZOLARI, Isabella (Ed.). Maior favela do DF, Sol Nascente é alvo de gangues e grileiros. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2015/03/maior-favela-do-df-sol-nascente-e-alvo-de-gangues-e-grileiros.html>>. Acesso em: 20 de outubro de 2018.

CARRARA, A. & PIKE, R.J. (2008). GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. Geomorphology, 94(1): 257-260.

CARRARA, A. & PIKE, R.J. (2008). GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. *Geomorphology*, 94(1): 257-260. CARRARA, A. & PIKE, R.J. (2008). GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. *Geomorphology*, 94(1): 257-260.

CASTRO, B.C. (2011). Modelo Geomecânico para os Principais Solos de Brasília. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 179 p.

CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA (CEPSRM). Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/resol.html>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

CROSTA, A. P., (1993). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Ed. Rev. - Campinas, SP: IG/UNICAMP.

CRUDEN D.M., VARNES D.J. (1996). Landslide types and processes. In: Landslides, Investigation and Mitigation, TURNER A.K., SCHUSTER R.L. (eds). Special Report 247. Transportation Research Board: Washington DC; 36-75.

DAS, I., SAHOO, S., VAN WESTEN, C., STEIN, A. e HACK, R. (2010) - Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, vol. 114, pp. 627-637.

ENTRALGO, J.F.T. (2013). Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116 p.

FITZ, Paulo Roberto (2008a). Geoprocessamento sem Complicação, São Paulo, Ed. Oficina de Textos.

FREDLUND, D.G., XING, A., FREDLUND, M.D. e BARBOUR, S.L. (1996) - The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, vol. 33, pp. 440-448.

GARCÍA, H.A.G. (2004). Avaliação da susceptibilidade aos movimentos de massa usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 140 p.

GUZZETTI F., MONDINI A.C., CARDINALI M., FIORUCCI F., SANTANGELO M., CHANG K.T. (2012) Landslide inventory maps: new tools for an old problem. Earth-Science Reviews, 112: 42-66. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001.

GUZZETTI, F. (2000) - Landslide fatalities and evaluation of landslide risk. Engineering Geology, vol. 53, pp. 89-107

HIGHLAND, L.M., AND BOBROWSKY, PETER, (2008). The landslide handbook - A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

HUTCHINSON, J.N. (1968). Mass Movements. In: Fairbridge, R.W. (ed.). (1968). The Encyclopedia of Geomorphology: New York, Reinhold Book Corporation, pp. 688-695.

HUTCHINSON, J.N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameter of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: Landslides, Proc. Fifth Int. Symp. on Landslides, (Ed. C. Bonnard), Lausanne, Switzerland, vol. 1: pp. 3-35.

IIINSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Geração de Imagens. Disponível em: <[http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57\\_PT.php](http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php)> . Acesso em: 20 de setembro de 2018.

LIAO, Z., HONG, Y., WANG, J., FUKUOKA, H., SASSA, K. KAR-NAWATI, D. e FATHANI, F. (2010) - Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced land-slides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, vol. 7, pp. 317-324.

MATOS, J. (2007). Geodesia e Sistema de Referência. Instituto Superior Técnico. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). 55p.

MONTRASIO, L. & VALENTINO, R. (2008). A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(1): 1149-1159.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS, PMA:GCA. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.

REATTO, A., MARTINS, E.S., FARIAS, M.F.R., SILVA, A.V. & CARVALHO JR., O.A.C. (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Embrapa, Planaltina, DF, 29 p.

REIS E., ZÉZERE J.L., VIEIRA G.T. & RODRIGUES M.L. (2003). Integração de Dados Espaciais em SIG Para Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Deslizamentos. *Finisterra*, 38(76): 3-34.

ROQUE, W.V. & SOUZA, N.M. (2008). Análise da Estabilidade de Taludes pelo Método Racional na Região do Taquari (DF). 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Porto de Galinhas, Pernambuco, 1: 1-9.

SCIENCE FOR A CHANGING WORLD (USGS). What are the band designations for the Landsat satellites? Disponível em : <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>. Acesso em: 21 de setembro de 2018.

SILVA, A. M., 2005. Banco de Dados de Curvas de Retenção de Água de Solos Brasileiros, dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005.

SILVEIRA, C.S. & RAMOS, J.A.S. (2007). Análise espacial com SIG de parâmetros ambientais e comportamento hidrológico (chuva-vazão) de uma bacia de drenagem montanhosa na serra dos órgãos: bacia do Paquequer, município de Teresópolis, RJ. Revista Brasileira de Geomorfologia, 8(1): 23-34.

TOMINAGA, L.K. (2007) - Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. PhD Thesis, University of São Paulo, 220 p.

VARNES, D. J. (1958). Landslides types and processes. In: Eckel, E.B., ed., Landslides and engineering practice, Special Report 28: Washington, DC, Highway Research Board, National Academy of Sciences, 28: 20-47.

VARNES, D. J. (1978). Slope movements types and processes. In: Schuster R.L., y Krizek R.J. (ed.). Landslides analysis and control. Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report, 176: 9-33.